

통과대역 및 전이영역 특성이 개선된 수중음파통신용 CIC 인터폴레이터 설계

김선희
상명대학교 시스템반도체공학과

Design of CIC Interpolators with Improved Passband and Transition Region for Underwater Acoustic Communication

Sunhee Kim

Division of System Semiconductor Engineering, Sangmyung University

요약 세계적으로 해양 자원 개발을 비롯하여 재난 방지 및 군사적 목적 등을 위하여 수중 환경 감시 및 제어를 가능하게 하는 수중 무선 통신망에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 호서대학교를 중심으로 ‘분산형 수중 관측 제어망’에 대한 연구가 진행되고 있는데, 본 논문에서는 해당 제어망 중 수중기지제어국과 수중기지국 사이의 음파 통신을 위한 인터폴레이터(interpolator)를 연구하였다. 수중 음파 통신망은 양방향 듀플렉스(duplex) 통신을 위하여 서로 다른 4개의 주파수 링크를 정의하고 있으며, 링크에 따라 100배 혹은 200배 샘플링 레이트를 변환해야 한다. 또, 수중은 전원 공급이 원활하지 않은 환경이므로 저전력 설계가 중요하다. 따라서 저전력 인터폴레이터인 CIC 인터폴레이터를 기본으로 하여 링크에 따라 샘플링 레이트를 선택할 수 있도록 설계하였다. 하지만 CIC 인터폴레이터는 통과 대역 감쇠(passband droop)가 크고, 전이 영역(transition region)이 넓기 때문에 채널 간격이 비교적 좁은 음파 통신에서는 저주파 대역 필터로서의 조건을 만족하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 통과 대역 감쇠를 보상하기 위한 보상 필터(compensator)와 전이 영역을 줄이기 위한 하프밴드 필터(halfband filter)를 추가하였다. Matlab을 이용하여 알고리즘을 검증한 후 Verilog-HDL로 하드웨어를 설계하고 Modelsim에서 시뮬레이션하여 동작을 검증하였다.

Abstract Research into underwater wireless networks that enable the monitoring and controlling of the ocean environment has been continuing for disaster prevention and military purposes, as well as for the exploitation of ocean resources throughout the world. A research group led by Hoseo university has been studying a distributed underwater monitoring and controlling network. In this study, we developed an interpolator for acoustic communication between an underwater base station controller and underwater base station, which is included in this network. The underwater acoustic communication provided by this network defines four links whose sampling rates are different. Low power consumption is one of the most important requirements.

Therefore, we adopted CIC interpolators, which are known to act as filters with a low power consumption, and some CIC interpolators with an appropriate changing rate were selected depending on the link. However, these interpolators have a large passband drop and wide transition region. To solve these problems, we added a compensator and half-band filter. After verifying the algorithm by using Matlab, we designed and verified it with Verilog-HDL in a ModelSim environment.

Keywords : cic filter, halfband filter, interpolator, underwater acoustic communication, upsampling

*Corresponding Author : Sunhee Kim(Sangmyung Univ.)

Tel: +82-41-550-5357 email: happyshkim@smu.ac.kr

Received October 12, 2017

Revised November 13, 2017

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

1. 서론

지구의 약 2/3를 차지하고 있는 해양에 대하여 해양 생물 자원 및 지하 자원 등의 개발뿐만 아니라 군사적 목적 및 지구 온난화에 따른 환경 감시 등을 위하여 해양에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이의 일환으로 수중 환경 감시 및 제어를 가능하게 하는 수중 무선 통신망에 대한 연구도 증가하고 있다[1-3]. 전자기파와 광학은 수중에서 거리에 따른 신호 감쇠가 크기 때문에, 미국 WHOI Acoustic Communications Group[4], 유럽 연합의 SUNRISE 프로젝트[5] 및 일본 JAMSTEC[6] 등 대부분의 수중 무선 통신 연구 기관에서는 수중에서 수십 Km까지 통신이 가능한 음파를 이용하고 있다. 국내에서도 호서대학교를 중심으로 ‘분산형 수중 관측 제어망 개발’ 연구가 진행되고 있으며, 100 KHz 대역 이하의 음파를 이용하여 수중 센서 노드들을 제어한다[7,8].

분산형 수중 관측 제어망은 수중기지국을 중심으로 하여, 수중기지제어국과 수중기지국 간의 통신망과 수중기지국과 수중 노드 간의 통신망으로 구성된다[7]. 수중 음파채널의 다중 경로 문제 및 채널 환경이 급격히 변하는 특성을 고려하여, 물리 계층에서는 다중 반송파 방식의 OFDM을 채택하였다. 전송할 데이터는 OFDM 심볼로 변환된 후 반송 주파수(carrier frequency) 대역으로 올려진 뒤 DAC를 통하여 아날로그 신호로 변환된다. 이 과정에서 데이터의 샘플링 레이트를 더 높은 DAC 샘플링 레이트로 변환하기 위해서는 인터폴레이터(interpolator)가 요구된다.

본 논문은 분산형 수중 관측 제어망의 수중기지제어국과 수중기지국 간의 통신을 위한 인터폴레이터(interpolator)를 연구하였다. 수중 음파 통신 모델의 경우 DSP 등 프로세서를 기반으로 연구가 많이 진행되고 있으나[3,9,10], 수중은 전원 공급이 원활하지 않은 환경이므로 저전력 설계가 중요하다. 따라서 저전력 시스템 구현을 위하여 OFDM 모델과 함께 전용 하드웨어로 구현될 수 있도록 인터폴레이터 하드웨어를 설계하였다. 2장에서 수중음파통신을 위한 샘플링 레이트 변환에 대한 간략한 소개와 함께 인터폴레이터의 구조 및 주파수 응답 특성을 설명하였다. 3장에서는 하드웨어 설계 시뮬레이션 결과를 보이고, 마지막으로 4장에서 간단히 결론을 맺었다.

2. 수중음파통신을 위한 인터폴레이터

2.1 샘플링 레이트 변환 개요

분산형 수중 관측 제어망의 수중기지제어국과 수중기지국은 양방향 듀플렉스(duplex) 방식을 사용한다. 따라서 표 1에 정리한 바와 같이 상향 링크(Uplink, UL)와 하향 링크(Downlink, DL)는 서로 다른 주파수를 사용하며, 상향 링크는 다시 3개의 링크로 구분된다. 음파 통신은 반송 주파수 대역이 비교적 낮으며, 수중기지국과 수중 노드 사이에 할당된 반송 주파수 대역까지 고려하였을 때, 채널 간 간격은 약 1 KHz로 각 채널별 데이터 처리 시 필터링에 유의해야 한다.

Table 1. Carrier frequency, baseband data rate, DAC sampling rate, and sampling rate changing factor according to links

Link	Carrier frequency (Fc)	Baseband data rate (F _B)	DAC sampling rate (F _{S DAC})	Sampling rate changing factor (R=F _{S DAC} /F _B)
UL0	12 KHz	5 Ksps	1 Msps	200
UL1	18 KHz	5 Ksps	1 Msps	200
UL2	65 KHz	10 Ksps	1 Msps	100
DL	5.5 KHz	5 Ksps	1 Msps	200

베이스밴드(Baseband) 신호는 반송 주파수 대역으로 올리기 전에 샘플링 레이트를 높여야 한다. 베이스밴드 신호의 샘플링 레이트는 베이스밴드 신호의 데이터 레이트(F_B)와 동일하며, 표 1에 나와 있는 바와 같이, DAC는 모든 링크의 신호에 대하여 1 Msps로 샘플링한다. 따라서 UL0, UL1 및 DL 신호는 샘플링 레이트를 200배 높여주고, UL2 신호는 100배 높여줘야 한다.

2.2 인터폴레이터의 구조

샘플링 레이트를 높이기 위해서 일반적으로 ‘0’ 삽입(zero padding) 방법을 사용한다. 이 과정에서 베이스밴드 신호의 허상(imaging)이 발생하므로 이를 제거하기 위하여 저주파 대역 통과 필터(Low Pass Filter, LPF)가 필요하다. 본 논문에서는 LPF 특징을 갖는 cascaded integrator-comb(CIC) 필터를 사용하여 인터폴레이터를 구성하였다.

CIC 인터폴레이터의 전달 함수 및 주파수 응답특성은 다음과 같다.

$$H(z) = \frac{(1 - z^{-RM})^N}{(1 - z^{-1})^N} = \left(\sum_{k=0}^{R-1} z^{-k} \right)^N \quad (1)$$

$$|H(f)| = \left| \frac{\sin(\pi Mf)}{\sin(\pi f/R)} \right|^N \quad (2)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 CIC 필터 계수는 모두 ‘1’이기 때문에 필터 계수 저장 및 곱하기 연산을 필요로 하지 않는다. 따라서 하드웨어 면적과 파워 소모 측면에서 효율이 좋아 수중 통신 모뎀에서 사용하기에 적합하다. 하지만 식 (2)에서 보는 바와 같이 CIC 필터는 sinc 함수 형태를 갖기 때문에 통과 대역 감쇠(passband droop)가 크고, 전이 영역(transition region)이 넓다는 단점이 있다.

우리는 이전에 수중기지제어국과 수중기지국 간의 통신을 위한 디지털 업 컨버터를 설계하였으며, 샘플링 레이트를 높이기 위하여 CIC 인터폴레이터를 3단으로 배치하였다[11]. 그림 1은 DL인 경우에 3개의 CIC 인터폴레이터 각각 및 3개가 종속된(cascaded) CIC 인터폴레이터의 주파수 대역 특성을 보여준다. 그림 1(a)에서 알 수 있듯이, 3개 종속된 CIC 인터폴레이터는 샘플링 레이트를 1 Msps로 총 200배 높여주며, LPF의 특성을 나타낸다. 그런데, 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 차단 주파수(cutoff frequency) 2.45 KHz와 저지대역 주파수(stopband frequency) 2.5 KHz에서 주파수 응답 크기가 각각 약 -10.3 dB와 -10.9 dB로, 통과 대역 및 전이 영역 특성이 좋지 않다.

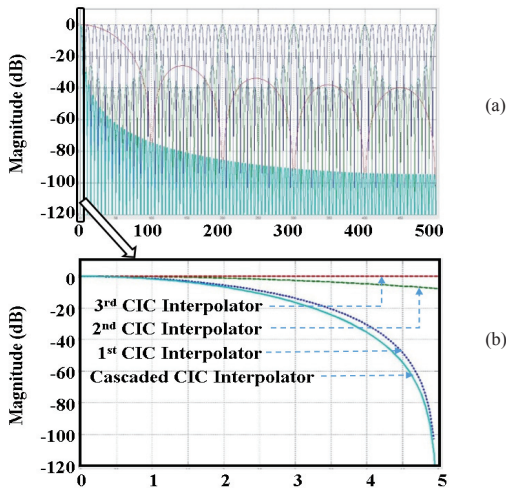


Fig. 1. Magnitude of frequency response of the 1st CIC interpolator, the 2nd CIC interpolator, the 3rd CIC interpolator and the cascaded CIC interpolators (a) in the frequency range from 0 to 500 KHz, and (b) from 0 to 5 KHz

본 논문에서는 그림 2와 같이 통과 대역 감쇠를 개선하기 위한 보상 필터와 전이 영역 개선을 위한 하프밴드 필터를 추가하여 인터폴레이터를 설계하였다. 제안하는 인터폴레이터도 3단계에 걸쳐 샘플링 레이트를 변경하는 구조이며, 세 번째 단계에서 링크에 따라 CIC 인터폴레이터 비율을 선택하였다.

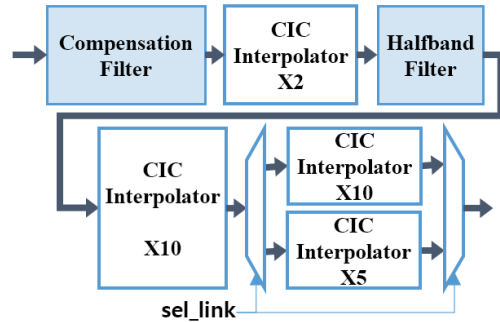


Fig. 2. Blockdiagram of the interpolator

2.3 인터폴레이터의 주파수 특성

그림 1(b)에서 알 수 있듯이, 종속된 CIC 인터폴레이터의 통과 대역의 감쇠와 전이 영역의 폭에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 첫 번째 CIC 인터폴레이터이다. 따라서 보상 필터는 첫 번째 CIC 인터폴레이터 통과 대역에 대한 보상 필터로, 1/sinc 형태로 구성하였다. 파워 소모 및 하드웨어 사이즈를 낮추기 위하여, 보상 필터를 샘플링 레이트가 낮은 CIC 인터폴레이터 앞에 추가하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 설계된 보상 필터(Comp. Filter)는 CIC 인터폴레이터의 전송 대역을 보상을 한다.

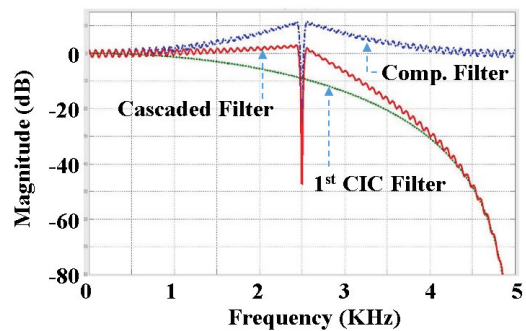


Fig. 3. Magnitude of frequency response of the compensation filter, 1st CIC interpolation filter, and the Comp.-CIC cascaded filter.

보상 필터는 전송 대역뿐만 아니라 저지대역에 대해서도 증폭시켜주기 때문에, 전이 영역을 좁히면서 저지대역을 억제하기 위한 하프밴드 필터를 첫 번째 CIC 인터폴레이터 다음에 추가하였다. 하프밴드 필터는 LPF로, 입력 신호 주파수 f_s 에 대하여 $(1/4)*f_s$ 에서 전이 대역의 중간 주파수를 갖는 것을 특징으로 한다. 따라서 2.5 KHz 에서 전이 대역을 갖는 하프밴드 필터를 사용하기 위하여, 첫 번째 CIC 인터폴레이터는 2배 업 샘플링 된 10 Ksps의 신호를 출력한다. 그림 4에서 보상 필터, 첫 번째 CIC 인터폴레이터, 하프밴드 필터, 그리고 이 3개를 중속 연결한 필터의 주파수 반응 결과를 확인할 수 있다. 차단 주파수와 저지대역 주파수에서 주파수 응답 크기는 각각 약 -1.1 dB와 -34.8 dB로 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다.

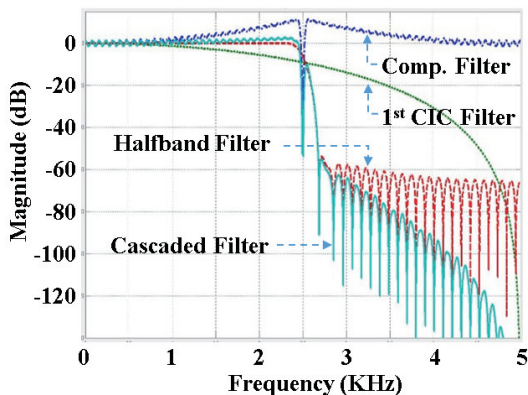


Fig. 4. Magnitude of frequency response of the compensation filter, 1st CIC interpolation filter, halfband filter and the Comp.-CIC-halfband cascaded filter.

결과적으로, 1단계 및 2단계 CIC 인터폴레이터는 각각 2배, 10배로 모든 링크에 대해 공통으로 적용하고, 마지막 3단계에서 UL0, UL1 및 DL은 10배, 그리고 UL2는 5배 샘플링 레이트를 높인다.

3. 하드웨어 설계 및 시뮬레이션 결과

통과 대역 및 전이 영역 특성이 개선된 인터폴레이터를 Verilog-HDL로 설계한 뒤 ModelSim으로 시뮬레이션을 하였다. 1 MHz 클럭을 공통으로 사용하였으며 각

블록의 샘플링 레이트에 맞추어 clock enable 신호를 만들었다. 각 블록의 입력과 출력 데이터 및 필터 계수는 모두 16 비트로 설정하였다. 각 블록의 계산 중에는 데이터 표현을 위해 필요한 비트수를 계속 유지하여 오류를 줄였고, 마지막 출력에서만 유효한 비트 수로 정리하였다. 하드웨어 설계 검증을 위해서 수중 음파 통신 시스템의 베이스밴드 신호를 이용하였다.

그림 5는 Verilog-HDL로 설계한 인터폴레이터의 시뮬레이션 결과로, DL용 입력 데이터(data_in)에 대하여 각 블록별 출력 신호를 보여주고 있다. 입력 데이터와 보상 필터 출력(data_out_comp)은 같은 샘플링 레이트를 나타내고 있으며, 첫 번째 CIC 인터폴레이터의 출력(data_out_1stCIC)과 하프밴드 필터 출력(data_out_hb)의 샘플링 레이트는 입력 데이터의 샘플링 레이트에 비하여 2배가 되었음을 알 수 있다. 두 번째 CIC 인터폴레이터의 출력(data_out_2ndCIC)과 세 번째 CIC 인터폴레이터의 출력(data_out_3rdCIC)은 각각 10배씩 샘플링 레이트가 증가되면서 LPF 처리되었음을 알 수 있다.

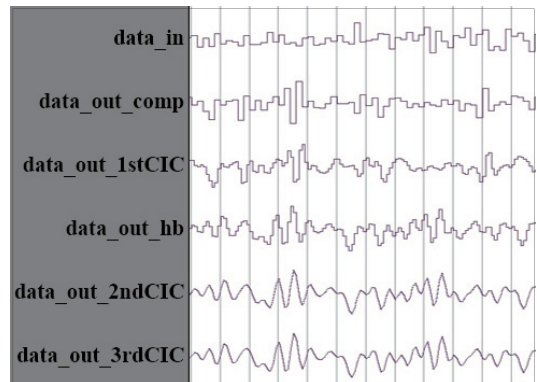


Fig. 5. Verilog-HDL simulation results; data_in: input data, data_out_cmp: output of compensation filter, data_out_1stCIC : output of the 1st CIC interpolator, data_out_hb : output of the halfband filter, data_out_2ndCIC : output of the 2nd CIC interpolator, and data_out_3rdCIC : output of the 3rd CIC interpolator

그림 6은 DL에 대하여 Verilog-HDL로 설계한 인터폴레이터의 시뮬레이션 결과를 FFT 연산을 통하여 주파수 대역으로 변환한 결과이다. 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 디지털 신호 처리된 베이스밴드 신호는 +/- 2.5 KHz 대역으로 한정되어 있다. 보상 필터, 첫 번째 CIC 인터폴레이터, 그리고 하프밴드 필터를 통과한 신호는

그림 6(b)와 같이 여전히 +/- 2.5 KHz 대역으로 한정되어 있으면서 샘플링 레이트는 2배 높아졌다. 두 번째 CIC 인터폴레이터 및 세 번째 CIC 인터폴레이터를 거친 후에는 그림 6(c), (d)에서 보는 바와 같이 샘플링 레이트가 각각 10배씩 증가하였다.

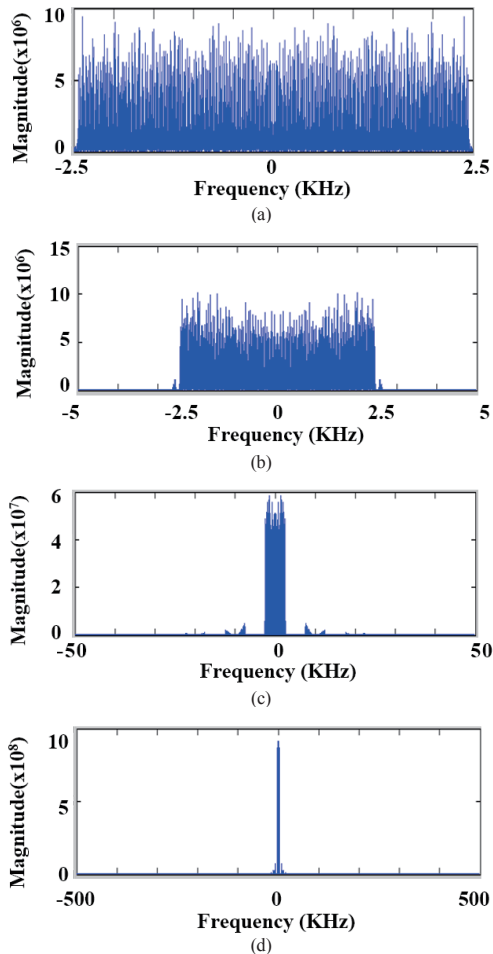


Fig. 6. FFT results of (a) basband signals, (b) output signals of comp.-1st CIC-halfband cascaded filter, (c) output signals of 2nd CIC interpolator, and (d) output signals of 3rd CIC interpolator

4. 결론

본 논문에서는 분산형 수중 관측 제어망의 수중기지 제어국과 수중기지국 간의 통신을 위한 인터폴레이터를

설계하였다. Matlab을 이용하여 인터폴레이션 알고리즘 검증 및 하드웨어 구조를 설계한 뒤, 이를 바탕으로 Verilog-HDL로 하드웨어를 설계하고, ModelSim에서 동작을 검증하였다. CIC 인터폴레이터를 기본으로 하였으며, CIC 인터폴레이터의 통과 대역 감쇠 및 좁은 전이 영역 문제를 해결하기 위하여 보상 필터와 하프밴드 필터를 추가하였다. 수중 음파 통신 시스템의 OFDM 변조된 베이스밴드 신호를 이용하여, 시간 영역에서 하드웨어 설계를 검증하였다. 또한 하드웨어 설계 시뮬레이션 결과를 FFT 변환하여 주파수 영역에서도 인터폴레이션 되는 것을 확인하였다. 향후 본 연구를 통해 개발된 인터폴레이터는 수중기지제어국 및 수중기지국의 모뎀 시스템과 통합되어 서해안 및 남해안에서 테스트 될 계획이다.

References

- [1] Yong-woo Choi, Jun Hyeok Hwang, Dong Chan Park, Suk Chan Kim, "A Study on a Low Power Underwater Communication Modem for Implementation of Underwater Sensor Networks", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* vol. 39, no. 3, pp. 268-273, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.3.268>
- [2] Byung-Lok Cho, Gi-Yoon Maeng, "Alamouti MIMO-OFDM-based analysis in the vertical channel of the underwater communication", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 16, no. 8 pp. 5571-5578, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.8.5571>
- [3] Dongsoo Lee, Sangmin Lee, Sung-Joon Park, "DSP-Based Micro-Modem for Underwater Acoustic Communications", *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, vol.39, no.3, pp. 275-281, 2014. DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2014.39C.3.275>
- [4] The Acoustic Communications Group at WHOI, Available From: <http://acomms.whoi.edu> (accessed Oct, 5, 2017).
- [5] Sensing, monitoring and actuating on the Underwater world through a federated Research InfraStructure Extending the Future Internet - SUNRISE, Available From: http://fp7-sunrise.eu/Files/OpenCalls/Announcement_Open_Call_2_SUNRISE.pdf (accessed Oct, 5, 2017).
- [6] JAMSTEC, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Available From: <http://www.jamstec.go.jp/e/> (accessed Oct, 5, 2017).
- [7] Jin-Seon Hoo, Cho-Yong Kap, Im-Tae Ho, Ma-Hyun, Ko-Hak Lim, "Studies on the structure and operating frequency for the underwater base-station based on underwater acoustic communication systems", *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 448-449, 2015.

- [8] Kim Jun Ho, Im Tae Ho, Chung Tae Geon, Kim Se Yeon, Ko Hak Lim, "A Study on the trends of recent underwater communication network systems", *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 678-679, 2015.
- [9] Yong-woo Choi, Jun Hyeok Hwang, Dong Chan Park, Suk Chan Kim, "A Study on a Low Power Underwater Communication Modem," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 268-273, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.3.268>
- [10] Dongsoo Lee, Sangmin Lee, Sung-Joon Park, "DSP-Based Micro-Modem for Underwater Acoustic Communications," *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, vol. 39, no. 3, pp. 275-281, 2014. DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2014.39C.3.275>
- [11] H. Yan, L. Wan, S. Zhou, Z. Shi, J.-H. Cui, J. Huang, and H. Zhou, "DSP based receiver implementation for OFDM acoustic modems," *Physical Commun.*, vol. 5, no. 1, pp. 22-32, Mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2011.09.001>
- [12] Sunhee Kim, "Design of DUC/DDC for the Underwater Basestation Based on Underwater Acoustic Communication", *Journal of the Korea Acamedia-Industrial cooperation Society*, vol. 18, no. 5, pp. 336-342, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.5.336>

김 선 희(Sunhee Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 이화여자대학교 정보통신학과 (공학석사)
- 2002년 2월 ~ 2005년 2월 : 전자통신연구원 연구원
- 2005년 3월 ~ 2012년 5월 : 전자부품연구원 선임연구원
- 2016년 2월 : 이화여자대학교 전자공학과 (공학박사)

- 2016년 4월 ~ 2016년 8월 : 서울아산병원 의생명연구소 박사후연구원
- 2016년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 시스템반도체공학과 조교수

<관심분야>

무선 통신 SoC, 수중 통신